Journal of Horticultural Science
https://jhs.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 2, Summer 2023, p. 509-522

Investigating Nano-Titanium Dioxide on the Morphological and Biochemical Characteristics of Some Strawberry Cultivars under Hydroponic Cultivation Conditions

F. Javan[1], Y. Selahvarzi[2*], M. Kamali[3]

Received: 01-07-2022 Revised: 13-11-2022 Accepted: 03-12-2022 Available Online: 06-12-2022	**How to cite this article:** Javan, F., Selahvarzi, Y., & Kamali, M. (2023). Investigating nano-titanium dioxide on the morphological and biochemical characteristics of some strawberry cultivars under hydroponic cultivation conditions. *Journal of Horticultural Science, 37*(2), 509-522. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhs.2022.77464.1183

Introduction

Today, in the commercial production of strawberries, short day cultivars are used due to having large fruits of desirable quality .Among the short day cultivars available in Iranare Camarosa, Atabaki, Gaviota, Queen Aliza, Paros and McDonance, which can be cultivated at greenhouse. Titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles are one of the metal oxides that exist in three forms of rutile, brookite and anatase, which affect growth, enzymatic activity and photosynthesis. Reported titanium nano dioxide in the highest concentration used (11.5 mg/l) increases fruit formation percentage, leaf chlorophyll content, vitamin C content, fruit ripening index, fresh and dry weight of roots and shoots and yield of strawberries. In another study, it was shown that titanium dioxide treatment under drought stress can increase photosynthetic pigments, total soluble solids, vitamin C, phenol, flavonoid, anthocyanin, and antioxidant activity, and it also improved plant performance. increase the strawberry cultivar Ventana compared to the control treatment. In a research found that spraying titanium increases the biomass, fertility and quality of peach fruit. It has alsow been showed that the pomegranate size of flowers and fruits increased with using titanium nano dioxide, and this can increase the quantity and quality of Alberta peach cultivar. Foliar application of titanium nano dioxide in cucumber has been reported to increase photosynthesis and phenolic content and reduce lipid peroxidation. In a research, it was shown that titanium dioxide nanoparticles increased photosynthesis rate, water conductivity and transpiration rate in tomato leaves. Despite the effect of titanium dioxide nanoparticles on the quantitative and qualitative improvement of some agricultural products, the researches conducted on strawberry plants were not complete or were only conducted on a specific variety. Therefore, with the aim of investigating and comparing the morphological and biochemical traits of some commercial strawberry cultivars under the effect of foliar spraying with titaniumdioxide, the above research was conducted.

Materials and Methods

This research was conducted to investigate the effect of nano titanium dioxide foliar spraying on four strawberry cultivars in the hydroponic greenhouse of the Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad in 2020-2021. Experimental treatments included 4 levels of titanium nano dioxide (0, 5, 10 and 20 mg/l) and 4 strawberry cultivars (Sabrina, Paros, Gaviota and Camarosa) with 4 replications. The research was done in a factorial manner based on a completely random design. JMP 8 software was used to perform variance analysis and compare the averages of the measured traits. Means were compared using Tukey test at 5% probability level and graphs were drawn using Excel 2010 software.

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated, Assistant Professor and Ph.D. Graduated, Department of Horticultural Science and Landscape, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: selahvarzi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jhs.2022.77464.1183

Results and Discussion

According to the tables of mutual effects of titanium dioxide nano treatments and varieties, it can be found that the application of titanium dioxide nanoparticles had a positive effect on the desired characteristics in all four studied strawberry varieties. So that the application of different levels of titanium dioxide nano particles causes a significant increase in quantitative traits (number of leaves, leaf area, root length, fresh and dry weight of aerial and root parts, photosynthetic pigments) The yield-dependent traits compared to the control plants were found in strawberry-strawberry cultivars. Nano titanium dioxide had an effect in increasing the number of fruits and vegetative traits of all investigated cultivars, in such a way that, on the one hand, with a balanced increase in vegetative growth, and on the other hand, improving the efficiency of photosynthesis and absorption through the roots and increasing the percentage of fruit formation. , increased the yield per plant. Also, sprinkling of titanium nanoparticles on all levels caused a significant increase in juice pH, TSS, TA, vitamin C, anthocyanin, total phenol, flavonoid and in general qualitative traits compared to the control. In the treatment of nano titanium dioxide, especially at the level of 10 mg/liter, better results were observed.

Conclusion

According to the results, the use of Paros and Gaviota cultivars is recommended to farmers and agricultural researchers due to its high yield and good quality.

Keywords: Amount of soluble solids, Antioxidants, Cultivars, Leaf area, Number of fruits

نشریه علوم باغبانی
https://jhs.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۷، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص. ۵۲۲-۵۰۹

بررسی نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی برخی از رقم‌های توت‌فرنگی در شرایط کشت هیدروپونیک

فاطمه جوان[۱]- یحیی سلاح ورزی[۲*]- مریم کمالی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲

چکیده

توت‌فرنگی به دلیل عطر، طعم و دارا بودن ارزش غذایی بالا جایگاه خود را در رژیم غذایی میلیون‌ها نفر در جهان پیدا کرده است. امروزه عواملی از قبیل تغیرات آب و هوایی، محدود شدن منابع آب و خاک، افزایش آلودگی محیط زیست، مشکلاتی در زمینه کشاورزی و تولید غذای کافی و سالم به وجود آورده است. از این رو دانشمندان برای غلبه بر این مشکلات ابزارهای گوناگونی به کار می‌برند که از آن جمله می‌توان به فناوری نانو اشاره نمود. به همین منظور پژوهشی برای بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی در چهار رقم توت‌فرنگی در گلخانه هیدروپونیک گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) و چهار رقم توت‌فرنگی ('سابرینا'، 'پاروس'، 'گاویوتا' و 'کاماروسا') بود. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ارقام مورد مطالعه از نظر صفات مورد بررسی وجود داشت. در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم تعداد میوه در ارقام 'سابرینا' (۱/۷۲)، 'پاروس' (۲/۰۳)، 'گاویوتا' (۲/۵۹) و 'کاماروسا' (۱/۶۵) برابر نسبت به تیمار شاهد و سطح برگ بوته در ارقام'سابرینا' (۱۰/۱ درصد)، 'پاروس' (۱۹/۸ درصد)، 'گاویوتا' (۲۲/۳ درصد) و 'کاماروسا' (۶/۱ درصد) نسبت به تیمار شاهد و وزن خشک بخش هوایی در ارقام'سابرینا' (۲۳/۷ درصد)، 'پاروس' (۱۸/۸ درصد)، 'گاویوتا' (۲۶/۶ درصد) و 'کاماروسا' (۲۱/۵ درصد) نسبت به تیمار شاهد و طول رانر در ارقام 'پاروس' (۵۱ درصد) و 'گاویوتا' (۴۲/۹ درصد) نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. هم چنین در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین میزان وزن خشک ریشه (۸ گرم) و طول ریشه (۳۰/۱ سانتی‌متر) در رقم 'گاویوتا' و طول رانر (۱۶۶/۲ سانتی‌متر) در رقم 'پاروس' بدست آمد. بیشترین میزان pH آبمیوه در رقم 'گاویوتا' (۳/۹۷)، اسیدیته قابل تیتراسیون در رقم 'کاماروسا' (۳/۴ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تازه برگ)، مواد جامد محلول در رقم 'کاماروسا' (۹/۵ درجه بریکس) و آنتی‌اکسیدان در رقم 'سابرینا' (۹۰/۹ درصد) در سطح ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده ارقام 'گاویوتا' و 'پاروس' نسبت به دو رقم دیگر، از کارایی و عملکرد بهتری برخوردار بودند.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، تعداد میوه، رقم، سطح برگ، میزان مواد جامد محلول

۱، ۲ و ۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد علوم باغبانی، استادیار و فارغ التحصیل دکتری گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: Selahvarzi@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jhs.2022.77464.1183

مقدمه

توت‌فرنگی (*Fragaria×ananassa* Duch) از خانواده گلسرخیان[1] بوده و به دلیل طعم و ظاهر زیبا و داشتن اثرات مفید برای سلامتی، یکی از محبوب ترین محصولات در سراسر جهان است و به‌صورت تازه‌خوری یا فرآوری‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hossain *et al*., 2019؛Todeschini *et al*., 2018). امروزه در تولید تجاری توت‌فرنگی، از ارقام روز کوتاه به دلیل داشتن میوه‌های درشت با کیفیت مطلوب استفاده می‌شود (Galili Marandi, 2007). از ارقام روز کوتاه موجود در ایران می‌توان به 'کاماروسا' ، 'آتابکی'، 'گاویوتا'، 'کوئین‌الیزا'، 'پاروس' و 'مکدونانس' اشاره کرد که به صورت گلخانه‌ای قابل کشت است (Asadi Gharneh *et al*., 2014). پرورش گیاهان توت‌فرنگی در گلخانه روشی است که از آسیب‌های ناشی از ناهنجاری‌های طبیعی جلوگیری می‌کند و امکان تولید خارج از فصل و کشت بدون خاک را نیز فراهم می‌آورد (Tang *et al*., 2020). عملکرد بالا، کاهش مشکلات مربوط به آفات و در دسترس بودن دائم عناصر غذایی برای ریشه گیاه از جمله مزیت‌های کشت هیدروپونیک می‌باشند (Jung *et al*., 2015). فناوری نانو یک روش علمی جدیدی است که با استفاده از مواد و تجهیزات و دستکاری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد در سطح مولکولی می‌توان محصولات و خدمات مورد استفاده در زمینه‌های متنوع از پزشکی تا کشاورزی را گسترش داد (Siddiqi and Husen, 2016, 2017). نانو ذره دی اکسید تیتانیوم[2] یکی از اکسیدهای فلزی می‌باشد که به سه شکل روتایل، بروکیت و آناتاز وجود دارد که بر رشد، فعالیت آنزیمی و فتوسنتزی تأثیرگذار است (Li *et al*., 2015).

گزارش شده نانو دی اکسید تیتانیوم در بالاترین غلظت استفاده شده (۱۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر) باعث افزایش درصد تشکیل میوه، میزان کلروفیل برگ، میزان ویتامین ث، شاخص رسیدگی میوه، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و میزان عملکرد توت‌فرنگی رقم 'کوئین‌الیزا' گردید (Hashemi Dehkourdi *et al*., 2016). در پژوهشی مشخص شد محلول‌پاشی تیتانیوم باعث افزایش زیست‌توده، باروری و کیفیت میوه هلو می‌شود (Alcaraz *et al*., 2004). در پژوهشی دیگر، نشان داده شد که اندازه مادگی گل و میوه با بکارگیری نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت و همین امر می‌تواند باعث افزایش کمی و کیفی در هلو رقم 'آلبرتا' گردد (Kiafar *et al*., 2019). گزارش شده محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم در خیار، میزان فتوسنتز و محتوای فنولی را افزایش داده و باعث کاهش پراکسیداسیون لیپید شده است (Song *et al*., 2020). نشان داده شده است که تیمار دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی می‌تواند باعث افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، مواد جامد محلول کل، ویتامین ث، فنول، فلاونوئید، آنتوسیانین و فعالیت ضد اکسایشی شود و همچنین به خوبی توانست عملکرد گیاه توت‌فرنگی رقم 'ونتانا' را نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد (Moradi, 2020). صادقی و حسن پور (Sadeghi and Hasanpour, 2021) در پژوهشی روی توت فرنگی رقم 'سابرینا'، بیان کردند که بیشترین میزان عملکرد، وزن میوه، وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی، همچنین pH، مواد جامد محلول و کاروتنوئید در غلظت ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم بدست آمد. ژنگ و همکاران (Zheng *et al*., 2007) بیان کردند که برخی از نانو ذرات نظیر اکسید تیتانیوم می‌تواند در افزایش کارایی فتوسنتز گیاهان نقش مثبتی داشته باشد چون همانند کلروپلاست دارای قابلیت جذب نور می‌باشد. چانگ و همکاران (Chang *et al*., 2007)، در پژوهشی نشان دادند که با افزایش غلظت نانو ذره تیتانیوم از ۰/۰۰۲ تا ۲۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر، میزان بیماری باکتریایی برگ خیار کاهش یافت. در پژوهشی گزارش شده که استفاده از نانو تیتانیوم در بسته‌بندی خرما باعث کاهش معنی‌دار بار میکروبی شامل کپک و مخمر، باکتری‌های مزوفیل هوازی و کلیفرم می شود (Binesh *et al*., 2010). در پژوهشی دیگر با هدف بررسی اثرات متقابل نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید سلنیوم بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی رقم 'CH - Peto Early' تحت تنش شوری، نشان داده شد که تنش شوری منجر به کاهش کلیه پارامترهای رشدی گیاهان، درصد نسبی آب، محتوای کلروفیل، تجمع عناصر آهن، پتاسیم، تیتانیوم، کلسیم و سلنیوم شد. کاربرد نانوذرات در شرایط تنش به تنهایی و بویژه در ترکیب با یکدیگر اثر شوری را خنثی کردند و خسارت‌های ناشی از تنش شوری را کاهش دادند (Aminizade, 2019). ایلقنیجی و همکاران (Elghniji *et al*., 2014) نتیجه گرفتند که خاصیت فتوکاتالیستی دی‌اکسید تیتانیوم قادر به برطرف کردن خاصیت سمی 4-CP در گوجه فرنگی، پیاز و شلغم آبیاری شده با فاضلاب تحت تابش مستقیم نور آفتاب می باشد. در پژوهشی نشان داده شد که نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، موجب افزایش سرعت فتوسنتز، هدایت آب و سرعت تعرق در برگ‌های گوجه‌فرنگی گردید (Qi *et al*., 2013). علی رغم تأثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر بهبود کمی و کیفی برخی محصولات کشاورزی، پژوهش‌های انجام شده در گیاه توت‌فرنگی کامل نبود یا فقط بر یک رقم خاص انجام شده بود. لذا با هدف بررسی و مقایسه صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی برخی از ارقام تجاری توت‌فرنگی تحت تأثیر محلول‌پاشی با نانو دی اکسید تیتانیوم، پژوهش فوق انجام شد.

1- Rosaceae
2- Titanium dioxide nanoparticle

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر چهار رقم توت‌فرنگی در گلخانه هیدروپونیک گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل ۴ سطح نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) و ۴ رقم توت‌فرنگی ('سابرینا'[1]، 'پاروس'[2]، 'گاویوتا'[3] و 'کاماروسا'[4]) با ۴ تکرار بود. پژوهش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی انجام شد. دمای شب و روز گلخانه به ترتیب ۱۷ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۶ درصد بود. به منظور انجام پژوهش از چهار رقم توت‌فرنگی که از استان کردستان تهیه شده بودند، استفاده گردید. برای کاهش سطح تبخیر و تنفس در هنگام انتقال و قبل از کشت، برگ‌های توت‌فرنگی به غیر از برگ‌های جوان انتهایی هرس شد و به مدت چند ثانیه ریشه‌هایشان در محلول قارچ‌کش کاپتان + مانکوزب (دو در هزار) قرار گرفت. بعد ازآماده‌سازی، نشاءهای توت‌فرنگی درتاریخ یکم اسفند ماه ۱۳۹۹ در بستر کوکوپیت و پرلیت با نسبت ۶۰ :۴۰ در چهار ردیف به تفکیک ارقام، درون کیسه های رشد[5] (به ابعاد ۱۵×۹۰ سانتی‌متر) در گلخانه کاشته شدند. در هر کیسه رشد، تعداد ۸ تا ۹ نشاء توت‌فرنگی کاشته شد. قطر طوقه نشاءهای مورد استفاده در زمان کاشت، ۹ میلی‌متر بود. سپس در هر ردیف، تعداد ۳۲ نشاء و در مجموع ۱۲۸ نشاء استاندارد (نشاءها عاری از بیماری و سالم و از نظر جثه و تعداد برگ یکسان در نظر گرفته شدند) برای انجام آزمایش انتخاب شدند. از محلول غذایی مورگان برای تغذیه گیاهان توت‌فرنگی استفاده شد. برای جلوگیری از رشد جلبک‌ها و خزه ها، مخزن توسط پلاستیک‌های سیاه رنگی پوشش داده شد. قطره چکان‌ها طوری تنظیم شده بود که روزانه ۲۴۰ میلی‌لیتر محلول از آن خارج شود، به طوری که روزی سه بار کودآبیاری (در ساعات ۸، ۱۶ و ۲۴) انجام می‌شد. محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم از یک ماه بعد از انتقال و کاشت نشاء، در مرحله سه الی چهار برگی بوته‌ها هر هفته یکبار (در هفته‌های پنجم، ششم، هفتم و هشتم) و در مجموع ۴ بار انجام گرفت. برای افزایش راندمان جذب عناصر غذایی، محلول‌پاشی در هنگام صبح با استفاده از محلول‌پاش دستی انجام شد. برای پیشگیری از بیماری‌های قارچی بوته‌های توت‌فرنگی، محلول‌پاشی برگی با قارچ‌کش کاربندازیم (دو در هزار) هر دو هفته یک‌بار صورت گرفت. هفته‌ای یک‌بار بسترها با آب مقطر آبشویی شد. طول دوره رشد در پژوهش حاضر، ۴ ماه بوده است و میوه‌ها در مرحله بلوغ تجاری بر اساس شاخص رنگ سطح میوه، یک هفته بعد از آخرین مرتبه محلول‌پاشی، یعنی از هفته اول اردیبهشت تا پایان انجام پژوهش (۱۵ تیرماه ۱۴۰۰) برداشت شدند.

اندازه گیری ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی

تعداد میوه‌های کامل و رسیده در طول دوره کشت شمارش و ثبت گردید. پس از توزین میوه‌ها، طول و قطر آن‌ها با استفاده از کولیس دیجیتالی (مدل Mitutoyo) اندازه‌گیری شد. پس از پایان دوره رشد و جمع‌آوری بوته‌ها، برگ‌های هر بوته به طور جداگانه شمارش شده و ثبت گردید. تعداد ساقه‌های رونده[6] هر بوته و تعداد گره‌های مربوط به آن شمارش شد. طول ساقه‌های رونده و فاصله میانگره‌ها به‌وسیله خط کش اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین ارتفاع گیاه (با توجه به بوته‌ای بودن توت‌فرنگی، برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاه، از ابتدای طوقه تا سطح آخرین برگ محاسبه شد) و طول ریشه نیز با استفاده از خط‌کش اندازه گیری شدند.

برای اندازه‌گیری وزن خشک بخش هوایی و ریشه، در پایان آزمایش بوته‌ها را از بستر کشت خارج کرده و به دو قسمت بخش هوایی و ریشه تقسیم نموده و ریشه‌ها را به خوبی شست و شو داده تا مواد زاید از داخل آن خارج گردد. سپس نمونه ها در آونی با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و پس از خشک شدن، به‌وسیله ترازوی دیجیتال مدل GF-300 با دقت ۰/۰۰۰۱ وزن شدند (Ghasemi *et al.*, 2018). با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (Model Li-Cor- 1300, USA)، میزان سطح برگ گیاهان مورد سنجش قرار گرفت.

pH عصاره صاف‌شده میوه با استفاده از دستگاه pH متر مدل Sartorius در دمای اتاق اندازه‌گیری گردید.

برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول در میوه (TSS)، ابتدا میوه‌ها با همزن مکانیکی به طور کامل و یکدست مخلوط شدند (حدود ۱۰ میوه برای هر تیمار) تا پوره یکنواخت میوه بدست آید. سپس به وسیله دستگاه رفراکتومتر دستی (ATAGO، ساخت ژاپن) مقدار بریکس نمونه‌ها قرائت شد (Tanada-Palmu and Grosso, 2005).

برای اندازه‌گیری اسید قابل تیتراسیون (TA)، مقدار ۵ میلی‌لیتر از آبمیوه با محلول سود ۰/۳ نرمال تا رسیدن به pH=۸/۲ تیتر شد و از رابطه زیر مقدار اسید کل محاسبه گردید (Ghasemnezhad *et al*., 2013).

% Acid (w/v) = N×V1×Eq.wt/V2×10

در این فرمول N: نرمالیته سود، V1: حجم سود مصرفی، V2: حجم نمونه و Eq.wt: وزن مولکولی اسید غالب می‌باشد.

1- 'Sabrina'
2- 'Paros'
3- 'Gaviota'
4- 'Camarosa'
5- Growbag
6- Runner

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید، ۰/۰۲۵ گرم نمونه برگ را وزن کرده و با ازت مایع پودر شد. سپس در هاون چینی که حاوی ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد و ۰/۰۲۵ گرم منیزیم بود ساییده و به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس میزان جذب آن‌ها در طول موج‌های۴۷۰، ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Jenway Model 6305) قرائت گردید و با استفاده از روابط زیر میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم برگرم وزن تازه برگ بیان گردید (Lichtenthaler, 2001).

$$Chl\ a = [(12.25\times A_{663} - 2.79\times A_{646}) \times V] / [1000\times W]$$

$$Chl\ b = [(21.21\times A_{646} - 5.1\times A_{663}) \times V]/[1000\times W]$$

$$Chl\ (total) = Chl\ a + Chl\ b$$

$$Car = [(1000\times A_{470} - 1.8\times Chl\ a - 85.02\times Chl\ b) /198] / [1000\times W]$$

V = حجم استون مصرفی

W = وزن نمونه برگی مورد استفاده

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی عصاره میوه‌ها از طریق ویژگی خنثی‌کنندگی رادیکال آزاد DPPH (۱و ۱– دی فنیل ۲– پیکریل هیدرازیل) تعیین گردید (Ghasemnezhad *et al*., 2011). مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آبمیوه به ۹۰۰ میکرولیتر محلول DPPH ۰/۱ میلی‌مولار اضافه گردید. سپس به سرعت به هم زده شد و در دمای اتاق به‌مدت ۳۰ دقیقه در شرایط تاریکی تا رسیدن محلول به حالت یکنواخت نگهداری شد. مقدار جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (Jenway Model 6305) تعیین و از محلول تریس به عنوان Blank استفاده گردید.

$$DPPHsc\ (\%) = \{A\ control - A\ sample / A\ control\} \times 100$$

در این فرمول A sample: عدد خوانده شده نمونه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و A control: مقدار جذب (۱ میلی‌لیتر تریس + ۱ میلی‌لیتر DPPH) می‌باشد و DPPH حل شده در متانول بود.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه آماری داده‌ها بر اساس طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار و چهار تکرار انجام شد. برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین های صفات اندازه گیری شده از نرم افزار JMP 8 استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel 2010 صورت گرفت.

نتایج و بحث

طول، قطر و تعداد میوه

در ارتباط با صفات وابسته به عملکرد اندازه‌گیری شده، استفاده از تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به ایجاد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد شد و اثر متقابل تیمارهای رقم و نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر طول، قطر و تعداد میوه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش فعالیت احیایی نوری فتوسیستم II، آزادسازی اکسیژن، فعالیت فسفوریلاسیون نوری کلروپلاست، آنزیم روبیسکو و بهبود محتوای برخی از عناصر ضروری در بافت‌های گیاهی، موجب افزایش عملکرد محصولات مختلف می شود (Khater, 2015). همچنین، نانو ذره تیتانیوم میزان تشکیل کلروفیل را افزایش داده و به این ترتیب باعث افزایش فتوسنتز و عملکرد می‌شود (Hong *et al*., 2005 ؛Zheng *et al*., 2005). با اعمال تیمار نانو دی اکسید تیتانیوم در سطح محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در ارقام 'سابرینا'، 'پاروس'، 'گاویوتا' و 'کاماروسا'، به ترتیب تعداد میوه حدود ۱/۷۲، ۲/۰۳ ، ۲/۵۹ و ۱/۶۵ برابر نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی با محلول دی اکسید تیتانیوم) افزایش یافت (جدول ۳). با توجه به نتایج بدست آمده، ارقام 'گاویوتا' و 'پاروس' نسبت به دو رقم دیگر، عملکرد بهتری داشتند. هاشمی دهکردی و همکاران (Hashemi Dehkordi *et al*., 2016) در پژوهشی گزارش کردند نانو دی‌اکسید تیتانیوم باعث افزایش درصد تشکیل میوه و میزان عملکرد در توت فرنگی رقم 'کوئین‌الیزا' گردید، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

هر گیاهی جهت تولید میوه بیشتر و دستیابی به عملکرد بالا و رشد بهتر به ذخایر غذایی کافی و رشد رویشی مناسب نیازمند است که این امر با جذب بهینه آب و مواد غذایی ممکن خواهد بود (Eris, 2005 Turhan and). استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم باعث افزایش جذب آب و عناصر معدنی توسط ریشه می‌شود و تشکیل اسیدهای آمینه ضروری را افزایش می‌دهد (Mingyu *et al*., 2007). زمانی که جذب آب توسط گیاه افزایش یابد، آب بیشتری وارد میوه می‌شود و چون وزن میوه تابعی از میزان آب موجود در آن است، بنابراین با افزایش جریان آب به سمت میوه، اندازه و وزن آن زیاد خواهد شد. در این پژوهش دو صفت طول و قطر میوه به عنوان معیاری از اندازه میوه در نظر گرفته شد که در سطح محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار طول میوه در ارقام 'سابرینا' (۴۵/۳ میلی‌متر)، 'پاروس' (۴۷/۰ میلی‌متر)، 'گاویوتا' (۴۸/۵ میلی‌متر) و 'کاماروسا' (۴۱/۱ میلی‌متر) بدست آمد که بیشترین مقدار مربوط به رقم 'گاویوتا' بود (جدول ۳). با افزایش غلظت محلول پاشی از صفر به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، قطر میوه در ارقام 'سابرینا' (۲۰/۶ درصد)، 'پاروس' (۲۷/۴ درصد)، 'گاویوتا' (۲۳/۸ درصد) و 'کاماروسا' (۲۴/۵ درصد) نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (جدول ۳). کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم موجب افزایش طول و قطر میوه شد، که با نتایج آلکاراز و همکاران (Alcaraz *et al*., 2004) با محلول‌پاشی تیتانیوم روی هلو مطابقت دارد.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمارهای نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های رویشی ارقام توت‌فرنگی

Table 1- ANOVA for the effect of titanium dioxide nanoparticle treatments on the vegetative characteristics of strawberry cultivars

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares						
		طول میوه Fruit length	قطر میوه Fruit diameter	تعداد میوه Fruit number	سطح برگ leaf area	تعداد برگ Leaf number	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight
رقم Cultivar (C)	3	243.90 **	274.67**	609.70**	52599 **	3640.47 **	14.765**	8.455**
نانو دی اکسید تیتانیوم Titanium dioxide nanoparticle (T)	3	298.00 **	322.70**	2808.95**	20933 **	4203.93 **	20.669**	36.083**
C×T	9	3.66 **	66.41**	95.27**	12324**	80.96 *	0.753**	0.095**
خطا Error	48	0.05	4.15	0.26	1546	32.17	0.001	0.005
ضریب تغییرات C.V (%)	-	12.7	16.0	22.1	10.9	26.1	25.2	13.9

ns، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p\leq 0.01$ and $p\leq 0.05$, respectively

تعداد و سطح برگ

اثرمتقابل تیمارهای رقم و نانو دی‌اکسید تیتانیوم، بر تعداد و سطح برگ به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). در سطح محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، تعداد برگ در ارقام 'سابرینا' (۳۶/۶ درصد)، 'پاروس' (۶۳/۷ درصد)، 'گاویوتا' (۸۷/۰ درصد) و 'کاماروسا' (۳۲/۳ درصد) نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. یکی از عوامل بسیار مهم در رشد گیاه، سطح برگ می‌باشد و با افزایش سطح برگ به همان نسبت فتوسنتز یا ماده‌سازی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر شکل ساختمانی برگ، حرکت کلروپلاست در داخل سلول‌ها، میزان فشردگی دیواره تیلاکوئید و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ به جذب حداکثر نور و بالا رفتن میزان فتوسنتز کمک می‌کند (Taiz and zeiger, 2002). گزارش شده که نانو دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش جذب موادی مانند نیتروژن و منیزیم، میزان تشکیل کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های کلیدی را بالا برده، میزان سطح برگ و نهایتا فتوسنتز را افزایش می‌دهد (Zheng *et al*., 2005). با افزایش غلظت محلول‌پاشی از صفر به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، سطح برگ بوته در ارقام 'سابرینا' (۱۰/۱ درصد)، 'پاروس' (۱۹/۸ درصد)، 'گاویوتا' (۲۲/۳ درصد) و 'کاماروسا' (۶/۱ درصد) نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (جدول ۳). همانطور که در نتایج جدول ۳ آمده است کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم در همه ارقام منجر به افزایش تعداد و سطح برگ شد که نتایج این پژوهش با نتایج (Hokmabadi *et al*., 2006) در پسته و (Aminizade, 2019) در گوجه فرنگی مطابقت دارد.

تعداد و طول رانر، تعداد گره و فاصله میانگره

تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر تعداد و طول رانر، تعداد گره و فاصله میانگره در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲) و اثر متقابل تیمارهای رقم و نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر طول رانر در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار و بر تعداد رانر، تعداد گره و فاصله میانگره غیر معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج این پژوهش در ارتباط با تعداد رانر با نتایج (Tehrani, 2014) در توت‌فرنگی رقم 'کاماروسا' مطابقت دارد.

ارقام 'گاویوتا' و 'پاروس' نسبت به دو رقم دیگر در مورد صفات ذکر شده نتایج بهتری را نشان دادند، به نحوی که محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، طول رانر را در ارقام 'پاروس' (۵۱/۰ درصد) و 'گاویوتا' (۴۲/۹ درصد) نسبت به شاهد افزایش داد و بیشترین میزان طول رانر در سطح محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در رقم 'پاروس' (۱۶۶/۲سانتی‌متر) بدست آمد (جدول ۳).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای نانو دی اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های رویشی ارقام توت‌فرنگی

Table 2- ANOVA for the effect of titanium dioxide nanoparticle treatments on the vegetative characteristics of strawberry cultivars

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares					
		طول ریشه Root length	ارتفاع گیاه Plant height	تعداد رانر Number of runners	طول رانر Runner length	تعداد گره Number of nodes	فاصله میانگره Intermediate distance
رقم Cultivar (C)	3	37.64**	28.506**	14.229**	39659.2**	100.057**	1678.63**
نانو دی اکسید تیتانیوم Titanium dioxide nanoparticle (T)	3	183.05**	28.361**	12.687**	8298.5**	85.057**	845.54**
C×T	9	2.37**	1.256**	0.409^{ns}	448.8**	4.376^{ns}	35.83^{ns}
خطا Error	48	0.03	0.292	1.479	0.064	3.828	23.79
ضریب تغییرات C.V (%)	-	13.5	7.7	20.2	21.6	24.9	27.1

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively

جدول ۳- اثرات متقابل رقم × نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های رویشی توت‌فرنگی

Table 3- The mean comparison interactions cultivar and Titanium dioxide nanoparticle on strawberry vegetative characteristics

رقم Cultivar	نانو دی‌اکسید تیتانیوم Titanium dioxide nanoparticle (mg.L^{-1})	طول میوه Fruit length (mm)	قطر میوه Fruit diameter (mm)	تعداد میوه Fruit number	سطح برگ leaf area (cm^2)	تعداد برگ Leaf number	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight (g)	طول رانر Runner length (cm)
	0	36.8j	ef 32.5	26.2 h	5605.1 de	75.0 ef	4.8 g	9.7 h	30.2 m
	5	41.5 f	35.0 de	37.2 e	5691.1 d	82.5 de	5.1 e	10.5 f	38.2 k
'سابرینا'	10	45.3 c	39.2 bcd	45.2 c	6172.3 b	102.5 bc	6.5 c	12.0 c	63.2 i
'Sabrina'	20	36.0k	29.5 fg	19.2 j	5505.5 e	72.7 ef	3.9 i	8.4 j	22.7 o
	0	40.7 g	35.7 cde	28.5 g	5200.1 f	66.7 fg	4.5 h	10.6 f	110.0 e
	5	43.0 d	42.2 ab	41.5 d	5852.2 c	83.7 de	6.0 d	11.1 e	143.7 c
'پاروس'	10	47.0 b	45.5 a	58.0 a	6230.7 b	109.2 ab	7.5 b	12.6 b	166.2 a
'Paros'	20	38.2 i	35.0 de	22.2 i	5129.0 f	64.0 fg	4.0 i	9.0 i	85.0 h
	0	42.3 e	35.7 cde	20.5 j	5215.3 f	64.0 fg	6.0 d	10.5 f	103.1 f
	5	45.0 c	40.7 abc	44.2 c	6167.0 b	89.7 cd	6.5 c	11.5 d	124.2 d
'گاویوتا'	10	48.5 a	44.2 ab	53.2 b	6379.1 a	119.7 a	8.0 a	13.3 a	147.4 b
'Gaviota'	20	40.0 h	32.5 ef	16.0 k	5198.8 f	52.7 gh	5.0 f	9.6 h	90.0 g
	0	33.0 l	28.5 fg	19.7 j	4665.5 h	57.2 gh	4.0 i	9.3 i	26.2 n
	5	37.2 j	31.5 efg	25.2 h	4900.2 g	73.7 ef	4.4 h	9.9 g	32.7 l
'کاماروسا'	10	41.1 fg	35.5 de	32.7 f	4952.0 g	75.7 def	4.8 g	11.3 d	50.7 j
'Camarosa'	20	28.7 m	27.0 g	14.0 l	4293.3 i	47.7 h	3.1 j	8.0 k	19.2 p

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column shows no significant differences at 5% of probability level by Tukey test.

طول ریشه، وزن خشک ریشه و بخش هوایی، ارتفاع گیاه

تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم اثر معنی‌داری روی وزن خشک ریشه و بخش هوایی داشت (جدول ۱). در سطح محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، وزن خشک بخش هوایی در ارقام 'سابرینا' (۱/۲۱)، 'پاروس' (۱/۲۳)، 'گاویوتا' (۱/۲۶) و 'کاماروسا' (۱/۱۸) برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. با توجه به نتایج (جدول ۳) و (جدول ۵) در سطح

۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بیشترین میزان وزن خشک ریشه (۸ گرم) و طول ریشه (۳۰/۱ سانتی‌متر) در رقم ’گاویوتا‘ بدست آمد. نشان داده شده که در توت‌فرنگی رقم ’سابرینا‘، بیشترین وزن خشک ریشه و بخش هوایی در تیمار ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم مشاهده گردید (Sadeghi and Hasanpour, 2021) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. در پژوهشی نشان داده شد که دی اکسید تیتانیوم و دی اکسید سلنیوم به صورت جداگانه در شرایط تنش منجر به افزایش معنی‌دار ۲ و ۱/۵۸ برابری طول ریشه نسبت به شاهد شوری شدند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (Aminizade, 2019). گزارش شده، ارتفاع گیاه به شرایط محیطی بسیار حساس می باشد و به‌میزان زیادی به فتوسنتز بستگی دارد (Heschel and 2005 Riginos,). در سطح ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم، ارتفاع گیاه در ارقام ’سابرینا‘ (۷/۳ درصد)، ’پاروس‘ (۱۰/۲ درصد)، ’گاویوتا‘ (۹/۶ درصد) و ’کاماروسا‘ (۹/۰ درصد) نسبت به شاهد کاهش یافت (جدول ۵).

در پژوهشـــی اعمال تیتانیوم در محلول غذایی از طریق کاهش اثرات ســمی عناصــر دیگر، باعث افزایش رشــد در گیاه گوجه‌فرنگی گردید (Haghighi and Daneshmand, 2012). همچنین گزارش شده است تیتانیوم، فعالیت آهن در کلروپلاست برگ را افزایش داده و در نهایت باعث افزایش جذب مواد غذایی می شود (Alcaraz *et al*., 2004) و این امر وزن خشـــک ریشـــه و اندام هوایی گیاه را افزایش می‌دهد (Yang *et al*., 2006). زمانی که میزان کلروفیل افزایش پیدا کند، میزان فتوســـنتز نیز افزایش یافته و در نهایت منجر به افزایش رشــد ریشــه و جذب بیشــتر عناصــر معدنی می‌گردد (Hong *et al*., 2005).

pH، میزان مواد جامد محلول (TSS)، اســیدیته قابل تیتر (TA) و آنتی‌اکسیدان آبمیوه

اثر متقابل تیمارهای رقم و نانو دی اکسید تیتانیوم بر pH آبمیوه و اسیدیته قابل تیتر در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار، و بر میزان مواد جامد محلول و آنتی‌اکسیدان غیر معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم، افزایش معنی‌داری در تمام صفات ذکر شده مشاهده شد. از شاخص‌های مهم کیفی، TSS است که با کیفیت خوراکی میوه در زمان رسیدن رابطه مستقیمی دارد و مصرف‌کننده تمایل زیادی به مصرف میوه با TSS بالا دارد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان دادند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم سبب افزایش میزان مواد جامد محلول شدند. افزایش مواد جامد محلول می‌تواند یا ناشی از هیدرولیز ساکارز و تولید فروکتوز و گلوکز و یا آبگیری میوه باشد (Arena and Curvetto, 2008). بنابراین، با توجه به اینکه وزن تر میوه در طول تیمار افزایش یافت، شاید بتوان استنباط کرد که افزایش TSS از هیدرولیز ساکارز بوده است. گزارش شده روی توت‌فرنگی رقم ’سابرینا‘، بیشترین میزان pH و مواد جامد محلول در بالاترین سطح نانو دی‌اکسید تیتانیوم مشاهده گردید (Sadeghi and Hasanpour, 2021) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. ویژگی مهم در تعیین کیفیت میوه، اسید کل آن می‌باشد و اسیدهای قابل تیتر با غلظت اسیدهای آلی موجود در میوه به طور مستقیم ارتباط دارند (Akhtar *et al*., 2010) و برای میوه یک منبع اندوخته انرژی می‌باشند که با افزایش سوخت‌وساز در هنگام رسیدن میوه، طی اکسایش اسیدها در چرخه کربس مصرف می‌شوند (Marschner, 2012). یکی دیگر از معیارهای مهم برای ارزیابی کیفیت ارقام، فعالیت آنتی‌اکسیدانی می باشد. آنتی‌اکسیدان‌ها باعث جلوگیری از اکسیداسیون مولکول‌های زیستی سلول‌ها از جمله لیپیدها، DNA ها، پروتئین و کربوهیدرات‌ها می‌شوند (Dar *et al*., 2015).

بر اساس نتایج (جدول ۵) در سطح ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم، بیشترین میزان pH آبمیوه در رقم ’گاویوتا‘ (۳/۹۷)، TA در رقم ’کاماروسا‘ (۳/۴ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تازه برگ) و با توجه به (جدول ۶) بیشترین میزان TSS در رقم ’کاماروسا‘ (۹/۵ درجه بریکس) و آنتی‌اکسیدان (۹۰/۹ درصد) در ’سابرینا‘ بدست آمد.

رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید در برگ‌ها در طی مدت تیماردهی افزایش یافت (جدول ۴). به طوری که بیشترین میزان کلروفیل a (۳/۵ میلی‌گرم بر گرم)، b (۲/۸ میلی‌گرم بر گرم)، کل (۶/۴ میلی‌گرم بر گرم) و کاروتنوئید (۲/۲ میلی‌گرم بر گرم) در رقم ’گاویوتا‘ در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بدست آمد. در نتایج پژوهشی بیان شد که تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم روی ذرت بر محتوای کلروفیل (a و b)، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a به b، کاروتنوئید و آنتوسیانین معنی‌دار بود. در مرحله ظهور گل‌های نر و ماده، بیشترین میزان رنگدانه در مقایسه با شاهد ثبت گردید (Morteza *et al*., 2013). در پژوهشی دیگر گزارش شده است که نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم از طریق خاصیت فتوکاتالیستی و هدایت حرارتی خود موجب افزایش جذب آب، بهبود جذب نور در کلروفیل a و تحریک به افزایش نرخ تکاملی و تغییر اکسیژن شده، در نتیجه اثرات مفیدی بر فتوسنتز و عملکرد گیاهان دارد (Rezaei *et al*., 2015).

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر تیمارهای نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های بیوشیمیایی ارقام توت‌فرنگی

Table 4- ANOVA for the effect of titanium dioxide nanoparticle treatments on biochemical characteristics of strawberry cultivars

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares							
		اسیدیته آبمیوه pH juice	مواد جامد محلول TSS	اسید قابل تیتر Titulable acidity	آنتی اکسیدان Antioxidants	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoids
رقم Cultivar (C)	3	0.579**	63.292**	6.527**	1452.43**	2.767**	3.484**	12.427**	2.046**
نانو دی اکسید تیتانیوم Titanium dioxide nanoparticle (T)	3	0.104**	94.145**	9.406**	4136.75**	6.907**	3.564**	20.376**	2.772**
C×T	9	0.001**	0.162^{ns}	0.369**	18.44^{ns}	0.116**	0.027**	0.238**	0.022**
خطا Error	48	0.0001	0.112	0.010	14.12	0.003	0.0005	0.004	0.0008
ضریب تغییرات C.V (%)		4.8	35.1	48.0	21.2	31.2	35.3	32.6	37.4

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively

جدول ۵- اثرات متقابل رقم × نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر ویژگی‌های رویشی و بیوشیمیایی توت‌فرنگی

Table 5- The interaction effect of cultivar × titanium dioxide nanoparticle on strawberry vegetative and biochemical characteristics

رقم Cultivar	نانو دی‌اکسید تیتانیوم Titanium dioxide nanoparticle (mg.l^{-1})	طول ریشه Root length (cm)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	اسیدیته آبمیوه pH juice	اسید قابل تیتر Titulable acidity (mg.100g^{1} FW)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g^{1} FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g^{1} FW)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g^{1} FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg.g^{1} FW)
’سابرینا‘ ‘Sabrina’	0	22.0 g	21.9 de	3.74 e	0.4 h	1.6 g	1.2 j	2.9 i	0.8 i
	5	25.2 e	23.4 bc	3.82 d	1.2 ef	2.2 e	1.5 h	3.8 e	1.3 f
	10	27.1 c	24.4 ab	3.88 c	1.9 c	2.5 d	1.8 f	4.3 d	1.5 e
	20	19.0 j	20.3 e	3.92 b	2.6 b	1.4 h	0.9 m	2.3 k	0.6 j
’پاروس‘ ‘Paros’	0	23.1 f	24.5 ab	3.47 k	1.2 f	2.0 f	1.5 h	3.5 f	1.3 f
	5	26.1 d	24.7 ab	3.52 ij	1.9 c	2.7 c	2.0 e	4.7 c	1.5 e
	10	28.5 b	25.3 a	3.57 h	2.4 b	3.1 b	2.2 c	5.3 b	1.8 c
	20	20.0 i	22.0 de	3.69 f	2.9 b	1.5 gh	1.1 k	2.7 j	0.8 i
’گاویوتا‘ ‘Gaviota’	0	26.2 d	21.8 de	3.82 d	0.8 g	2.6 cd	2.1 d	4.8 c	1.6 d
	5	28.2 b	23.7 bc	3.88 c	0.9 g	3.0 b	2.4 b	5.5 b	1.9 b
	10	30.1 a	24.5 ab	3.92 b	1.0 fg	3.5 a	2.8 a	6.4 a	2.2 a
	20	21.1 h	19.7 f	3.97 a	1.6 d	1.6 g	1.5 h	3.2 h	1.1 g
’کاماروسا‘ ‘Camarosa’	0	22.2 g	21.0 e	3.43 l	1.5 de	1.4 h	1.0 l	2.4 k	0.8 i
	5	23.5 f	20.9 e	3.49 jk	2.0 c	2.0 f	1.3 i	3.4 g	1.0 h
	10	26.2 d	22.5 cd	3.54 i	2.8 b	2.5 d	1.7 g	4.2 d	1.3 f
	20	20.1 i	19.1 f	3.65 g	3.4 a	1.1 i	0.6 n	1.8 l	0.4 k

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column shows no significant differences at 5% of probability level by Tukey test.

نانو دی‌اکسید تیتانیوم موجب افزایش جذب موادی از جمله نیتروژن و منیزیم می‌شود و میزان تولید کلروفیل را افزایش می‌دهد (Zheng *et al*., 2007). نانو ذره تیتانیوم از طریق افزایش انرژی نورانی فتوسیستم II که توسط غشاء کلروپلاست جذب می‌شود و باید به فتوسیستم I منتقل شود و سپس با تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکترون‌ها، انتقال الکترون‌ها و همچنین با تقویت و توسعه فتولیز آب و آزادسازی اکسیژن، میزان فتوسنتز و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد (Mingyu *et al*., 2007) و این بدان علت است که نانو دی‌اکسید تیتانیوم به راحتی واکنش های اکسایش و احیاء را کاتالیز کرده و موجب تسریع در آزاد شدن الکترون‌های پرانرژی می شود (Yang *et al*., 2006). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم سبب افزایش میزان کاروتنوئیدها می‌گردد. این ذره‌ها به دلیل کوچک بودن و امکان نفوذ بالا، سبب جذب بهتر منیزیم، آهن و گوگرد شده و جذب نور را افزایش داده و تشکیل رنگدانه ها را تسهیل می‌نمایند (Mahmoodzadeh *et al*., 2013). تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل و کاروتنوئید نسبت به شاهد شد که به ترتیب با نتایج (Moradi, 2020) در توت‌فرنگی رقم 'ونتانا' و (Sadeghi and Hasanpour, 2021) در توت‌فرنگی رقم 'سابرینا' مطابقت دارد.

جدول ٦- اثرات ساده رقم و نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر برخی ویژگی‌های رویشی و بیوشیمیایی توت‌فرنگی

Table 6- The simple effects of cultivar and titanium dioxide nanoparticles on strawberry vegetative and biochemical characteristic

نانو دی‌اکسید تیتانیوم **Titanium dioxide nanoparticle (mg.l-1)**	تعداد رانر **Number of runners**	تعداد گره **Number of nodes**	فاصله میانگره **Intermediate distance (cm)**	مواد جامد محلول **TSS (Brix)**	آنتی اکسیدان **Antioidants (%)**
0	2.06 bc	3.81 c	22.81 b	5.88 d	58.45 d
5	2.81 b	5.75 b	24.88 b	6.48 c	74.68 c
10	3.75 a	8.31 a	31.62 a	7.69 b	86.37 b
20	1.75 c	3.18 c	14.00 c	11.30 a	95.75 a
رقم Cultivar					
سابرینا Sabrina	1.93 b	3.43 b	15.68 b	4.95 c	90.96 a
پاروس Paros	3.68 a	7.06 a	32.25 a	8.35 b	81.22 b
گاویوتا Gaviota	3.06 a	7.75 a	32.07 a	8.55 b	74.07 c
کاماروسا Camarosa	1.68 b	2.81 b	13.31 b	9.50 a	69.00 d

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column shows no significant differences at 5% of probability level by Tukey test.

نتیجه‌گیری

با توجه به جداول اثرات متقابل تیمارهای نانو دی‌اکسید تیتانیوم و رقم، مشاهده می‌شود که کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم تاثیر مثبتی روی خصوصیات مورد نظر در هر چهار رقم توت‌فرنگی مورد بررسی ایجاد کرد. به طوری که اعمال سطوح مختلف نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم، باعث افزایش معنی‌دار صفات کمی (تعداد برگ، سطح برگ، طول ریشه، وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، رنگیزه‌های فتوسنتزی و ....) و صفات وابسته به عملکرد نسبت به گیاهان شاهد در ارقام توت‌فرنگی شد. نانو دی‌اکسید تیتانیوم در افزایش تعداد میوه و صفات رویشی همه ارقام مورد بررسی اثر داشت، به گونه‌ای که از یک طرف با افزایش متعادل رشد رویشی و از طرف دیگر بهبود کارایی فتوسنتز و جذب از طریق ریشه و بالا بردن درصد تشکیل میوه، باعث افزایش عملکرد به ازای هر بوته گردید.

همچنین محلول‌پاشی نانو ذرات تیتانیوم در تمام سطوح باعث افزایش معنی‌دار pH آبمیوه، TSS، TA، ویتامین C، آنتوسیانین، فنول کل، فلاونوئید و به طور کلی صفات کیفی در مقایسه با شاهد گردید.

در تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم به خصوص در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نتایج بهتری مشاهده شد. در نهایت بر اساس نتایج بدست آمده ارقام 'گاویوتا' و 'پاروس' نسبت به دو رقم دیگر از کارایی و عملکرد بهتری برخوردار بودند.

منابع

1. Akhtar, A.N., Abbasi, A., & Hussain, A. (2010). Effect of calcium chloride treatments on quality characteristics of loquat fruit during storage. *Pakistan Journal of Botany*, *42*(1), 181-188.
2. Alcaraz, C., Botia, M., Carlos, F., & Fernando, R. (2004). Effect of foliar sprays containing calcium, magnesium and titanium on peach (*Prunus persica* L.) fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *84*(9), 949-954. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1703
3. Aminizade bezenjani, S. (2019). *Study of the interaction of nanoparticles of titanium dioxide and selenium dioxide on increasing the resistance of tomato plant under salinity stress*. University of Industrial and Advanced Technology.
4. Arena, M.E., & Curvetto, N.S. (2008). *Berberis buxifolia* fruiting: Kinetic growth behavior and evolution of chemical properties during the fruiting period and different growing seasons. *Scientia Horticulturae*, *118*, 120-127. http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2008.05.039
5. Asadi Gharneh, H., Arzani, K., Shogaeyan, A., Golparvar, A., & Sabbaghnia, N. (2014). Evaluation of genetic diversity in some strawberry (*Fragaria × annanasa* Duch.) cultivars in Iran using morphological characteristics. *Plant Productions*, *4*(37), 93-106.
6. Binesh, M., Mortazavi, A., Armin, M., & Moradi, M. (2010). Investigation of the use of titanium dioxide and silver nanocomposites in Mazafati date packaging on its microbial changes during storage. *Journal of Food Science and Technology*, *2*(1), 1-8.
7. Chang, L., Wang, Q., & Mei, H. (2007). Effect of nanoparticles on the bacterial community of the cucumber phyllosphere. *Chinese Journal of Agricultural Biotechnology*, *6*(2), 141-145. http://dx.doi.org/10.1017/S1479236209990179
8. Dar, T.A., Uddin, M., Khan, M.M.A., Hakeem, K.R., & Jaleel, H. (2015). Jasmonates counter plant stress: a review. *Environmental and Experimental Botany*, *115*, 49-57. http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.02.010
9. Elghniji, K., Sabrine, S., Ben, Mosbah, M., Elimame, E., & Moussaoui, Y. (2014). Detoxification of 4-chlorophenolin TiO_2 sunlight system: effect of raw and treated solution on seed germination and plants growth of various sensitive vegetables. *Toxicological and Environmental Chemistry*, *96*, 869-879. http://dx.doi.org/10.1080/02772248.2014.983511
10. Galili Marandi, R. (2007). *Tiny fruits*. Urmia University Jihad Publications 2: 240.
11. Ghasemi, K., Emadi, S.M., & Ghasemi, Y. (2018). Effect of different culture media on broccoli (*Brassica oleracea* var. italica) yield components and mineral elements concentration in soilless Culture. *Journal of Horticultural Science 31*(4), 694-704. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v31i4.58860
12. Ghasemnezhad, M., Sherafati, M., & Payvast, G.A. (2011). Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annunm*) fruits at two different harvest times. *Journal Scientia Functional Foods*, *3*(1), 44-49. http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.002
13. Ghasemnezhad, M., Zareh, S., Rassa, M., & Sajedi, R.H. (2013). Effect of chitosan coating on maintenance of aril quality, microbial population and PPO activity of pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Tarom) at cold storage temperature. *Journal Science of Food Agriculture*, *93*(2), 368-374. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5770
14. Haghighi, M., & Daneshmand, B. (2012). Comparison of titanium and titanium nanoparticles on growth and photosynthesis of tomato in hydroponic system. *Science and Technology of Greenhouse Cultures*, *4*(13), 73-79. (In persian).
15. Hashemi Dehkourdi, E., Mousavi, M., Moallemi, N., & Ghafariyan moghareb, M.H. (2016). Effect of nanoparticles of titanium dioxide (anatase) on physiological characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Queen Elisa) in hydroponic condition. *Journal of Plant Process and Function*, *5*(16), 1-8. (In Persian with English abstract)
16. Heschel, M.S., & Riginos, C. (2005). Mechanism of selection for drought stress tolerance and avoidance in Impatiens capensis (Balsaminaceae). *American Journal of Botany*, *92*, 37-44. https://doi.org/10.3732/ajb.92.1.37
17. Hokmabadi, H., Haidarinezad, A., Barfeie, R., Nazaran, M., Ashtian, M., & Abotalebi, A. (2006). *A new iron chelate introduction and their effects on photosynthesis activity chlorophyll content and nutrients uptake of pistachio* (*Pistacia vera* L.). International Horticultural Congress and Exhibition. Seoul, Korea. August, 13-19. http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.741.19
18. Hong, F., Yang, P., Gao, F., Liu, C., Zheng, L., Yang, F., & Zhou, J. (2005). Effect of nano-TiO_2 on spectral characterization of photosystem II particles from spinach. *Chemical Research in Chinese Universities*, *21*(2), 196–200.
19. Hossain, M.R., Natarajan, S., Kim, H.T., Jesse, D.M.I., Lee, C.G., Park, J.I., & Nou, I.S. (2019). High density linkage map construction and QTL mapping for runner production in allo-octoploid strawberry *Fragaria × ananassa* based on ddRAD-seq derived SNPs. *Scientific Reports*, *9*, 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-019-39808-9

20. Jung, D.H., Kim, H.J., Choi, G.L., Ahn, T.I., Son, J.E., & Sudduth, K.A. (2015). Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Transactions of the ASABE*, *58*(5), 1309-1319. http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.11228

21. Khater, M.S. (2015). Effect of titanium nanoparticles (TiO_2) on growth, yield and chemical constituents of coriander plants. *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*, *48*(4), 187-194.

22. Kiafar, H., Mosavi, M., Ebadi, A., Moallemi, N., & Fattahi Moghaddam, M.R. (2019). *Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on flower and fruit characteristics of early peach Alberta cultivar*. 11th Iranian Congress of Horticultural Sciences, 11: 1-5.

23. Li , J., Naeem, M.S., Wang, X., Liu, L., Chen, C., Ma, N., & Zhang, C. (2015). Nano- TiO_2 is not phytotoxicas revealed by the oilseed rape growth and photosynthetic apparatus ultra-structural response. *PLOS One*, *10*(12), p.e0143885. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143885

24. Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Extraction of photosynthetic tissues: chlorophylls and carotenoids. *Food Analytical Chemistry*, F4. 2.1- F4. 2.6.

25. Mahmoodzadeh, H., Aghili, R., & Nabavi, M. (2013). Physiological effects of TiO_2 nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Engineering and Applied Science*, *3*(14), 1365-1370.

26. Marschner, P. (2012). *Marschner, s mineral nutrition of higher plants*. (Academic Press: London). 651 pp.

27. Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., Chunxiang, Q., Xiaoqing, L., Liang, C., & Fashui, H. (2007). Promotion of energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II by nano-anatase TiO_2. *Biological Trace Element Research, 119*(2), 183-192. http://dx.doi.org/10.1007/s12011-009-8425-7

28. Moradi, I. (2020). *The effect of titanium dioxide nanoparticles on modulating the effects of water stress in strawberries under soilless cultivation conditions*. Faculty of Agriculture. Kordestan University.

29. Morteza, E., Moaveni, P., Farahani, H.A., & Kiyani, M. (2013). Study of photosynthetic pigments changes ofmaize (*Zea mays* L.) under nano TiO_2 spraying at various growth stages. *Springer Plus*, *2*(1), 247. http://dx.doi.org/10.1186/2193-1801-2-247

30. Qi, M., Liu, Y., & Li, T. (2013). Nano-TiO_2 improves the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress. *Biological Trace Element Research*, *156*, 323-328. http://dx.doi.org/10.1007/s12011-013-9833-2

31. Rezaei, F., Moaveni, P., & Mozafari, H. (2015). Effect of different concentrations and time of nano TiO_2 spraying on quantitative and qualitative yield of soybean (*Glycine max* L.) at Shahr-e-Qods, Iran. *Biological Forum – An International Journal*, *7*(1), 957-964.

32. Sadeghi, P., & Hasanpour, H. (2021). Effect of foliar application of nano-TiO_2 on some quantitative and qualitative attributes of strawberry fruit (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. Sabrina under deficit fertigation. *Journal of Horticultural Sciences and Techniques of Iran*, *22*(3), 371-382.

33. Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2016). Engineered gold nanoparticles and plant adaptation potential. *Nanoscale research letters* 11(1): 400. http://doi.org/10.1186/s11671-016-1607-2

34. Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2017). Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanos*cale *research letters* 12(1): 92. http://dx.doi.org/10.1186/s11671-017-1861-y

35. Song, C., Huang, M.C., White, J., Zhang, X., Wang, W., Kyei Sarpong, C., Jamali, Z.H., Zhang, H., Zhao, L., & Wang, Y. (2020). Metabolic profile and physiological response of cucumber foliar exposed to engineered MoS_2 and TiO_2 nanoparticles. *Elsevier*, 1-10. http://dx.doi.org/10.1016/j.impact.2020.100271

36. Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. Sinauer Associates.

37. Tanada-Palmu, P., & Grosso, C. (2005). Effect of edible wheat gluten-based films and coatings on refrigerated strawberry (*Fragaria ananassa*) quality. *Postharvest Biology and Technology*, *36*, 199-208. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.12.003

38. Tang, Y., Ma, X., Li, M., & Wang, Y. (2020). The effect of temperature and light on strawberry producthin in a solar greenhouse. *Solar Energy*, *195*, 318-328. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070

39. Tehrani, A. (2014). *The effect of foliar application of humic substances on some quantitative and qualitative characteristics of strawberry var. Camarosa*. Ph.D Dissertation, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).

40. Todeschini, V., Aitlahmidi, N., Mazzucco, E., Marsano, F., Gosetti, F., & Robotti, E. (2018). Impact of beneficial microorganisms on strawberry growth, fruit production, nutritional quality, and volatilome. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1611. http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.01611

41. Turhan, E., & Eris, A. (2005). Changes of micronutrients, dry weight, and chlorophyll contents in strawberry plants under salt stress conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36*(7-8), 1021-1028. http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200050418

42. Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C., & Yang, P. (2006). Influence of nano-anatase TiO_2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological Trace Element Research*, *110*(2), 179-190. https://doi.org/10.1385/BTER:110:2:179

43. Zheng, L., Hong, F., Lu, S., & Liu, C. (2005). Effect of nano-TiO_2 on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biological Trace Element Research, 104*(1), 83-91. http://dx.doi.org/10.1385/bter%3A104%3A1%3A083

44. Zheng, L., Mingyu, S., Chao, L., Liang, C., Huang, H., Xiao, W., Xiaoqing, L., Yang, F., Gao, F., & Hong, F. (2007). Effects of nanoanatase TiO_2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light illumination. *Biological Trace Element Research, 119,* 68-76. https://doi.org/10.1007/s12011-007-0047-3